УДК 629.7.018.7

НОВОЕ В ПРАКТИКЕ НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Мильштейн А. В., аспирант; Дрозда И. В., студент; Паслен В. В., доц., Ph.D.
(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

Траекторные измерения – это процесс измерения первичных параметров положения и движения объекта для определения траектории полета объекта на интервале измерений с прогнозированием его последующего движения на некотором отрезке времени. Поэтому важной является задача разработки и применения новых прикладных методов анализа траекторной информации, базирующихся на гибком использовании избыточных данных измерений для повышения точности и достоверности результатов.

В работах [1–3] было отмечено, что для полиномиального описания стохастических траекторий при совместной реализации пространственной и временной избыточности вводится система базисных функций и вектор коэффициентов сглаживающего полинома, состав и величина которого подлежат определению в ходе обработки. В работах [2, 3] были определены две клеточно-матричные структуры базисных функций для осуществления сглаживания путем совместной обработки данных ВТИ, обладающих пространственной и временной избыточностью.

Первая структура:

$$\varphi(t) = \begin{vmatrix} \varphi_x(t) & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_z(t) \end{vmatrix}, \qquad (1)$$

где $\varphi_l(t) = \left|(t-t_0)^1 ... (t-t_0)^k ... (t-t_0)^m\right|$;

$l = x, y, z$;

m – степень сглаживающего полинома;

t – текущий момент времени;

t_0 – момент времени, соответствующий середине интервала сглаживания.

С учетом (1) полиномиальное описание вектор-функции $r(t)$, определяющей положение ЛА и ее координатных составляющих, будет иметь вид:

$$r(t) = \varphi(t)A = \begin{vmatrix} \varphi_x(t) & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_z(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varphi_x(t)A_x \\ \varphi_y(t)A_y \\ \varphi_z(t)A_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum\limits_{k=0}^{m_x} a_{kx}\varphi_{kx}(t) \\ \sum\limits_{k=0}^{m_y} a_{ky}\varphi_{ky}(t) \\ \sum\limits_{k=0}^{m_z} a_{kz}\varphi_{kz}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x(t, A_x) \\ y(t, A_y) \\ z(t, A_z) \end{vmatrix}, \qquad (2)$$

где $A^T = \left|a_{0x} ... a_{mx} a_{0y} ... a_{my} a_{0z} ... a_{mz}\right|$;

a_{ml} – коэффициенты сглаживающего полинома соответствующей координатной составляющей вторичных параметров;

$l = x, y, z$.

Вторая структура:

$$\varphi(t,\tau)=\begin{vmatrix}\varphi_{00}(t,\tau_x)\varphi_{01}(t,\tau_x)\varphi_{02}(t,\tau_x)...\varphi_{m0}(t,\tau_x)\varphi_{m1}(t,\tau_x)\varphi_{m2}(t,\tau_x)\\ \varphi_{00}(t,\tau_y)\varphi_{01}(t,\tau_y)\varphi_{02}(t,\tau_y)...\varphi_{m0}(t,\tau_y)\varphi_{m1}(t,\tau_y)\varphi_{m2}(t,\tau_y)\\ \varphi_{00}(t,\tau_z)\varphi_{01}(t,\tau_z)\varphi_{02}(t,\tau_z)...\varphi_{m0}(t,\tau_z)\varphi_{m1}(t,\tau_z)\varphi_{m2}(t,\tau_z)\end{vmatrix}, \qquad (3)$$

где $\varphi(t,\tau)=(t-t_0)^0\tau_l^0(t-t_0)^0\tau_l^1(t-t_0)^0\tau_l^2...(t-t_0)^m\tau_l^0(t-t_0)^m\tau_l^1(t-t_0)^m\tau_l^2$;

τ_l – вторая независимая переменная базисной функции.

С учетом (3) полиномиальное описание вектор-функции *r(t)*, определяющей положение ЛА и ее координатных составляющих, будет иметь вид:

$$r(t,\tau,A)=\varphi(t,\tau)A=\begin{vmatrix}\varphi_{00}(t,\tau_x)\varphi_{01}(t,\tau_x)\varphi_{02}(t,\tau_x)...\varphi_{m0}(t,\tau_x)\varphi_{m1}(t,\tau_x)\varphi_{m2}(t,\tau_x)\\ \varphi_{00}(t,\tau_y)\varphi_{01}(t,\tau_y)\varphi_{02}(t,\tau_y)...\varphi_{m0}(t,\tau_y)\varphi_{m1}(t,\tau_y)\varphi_{m2}(t,\tau_y)\\ \varphi_{00}(t,\tau_z)\varphi_{01}(t,\tau_z)\varphi_{02}(t,\tau_z)...\varphi_{m0}(t,\tau_z)\varphi_{m1}(t,\tau_z)\varphi_{m2}(t,\tau_z)\end{vmatrix}\cdot|A|=$$

$$=\begin{vmatrix}\sum_{k=0}^{m_x}\sum_{l=0}^{2}a_{kl}\varphi_{kl}(t,\tau_x)\\ \sum_{k=0}^{m_y}\sum_{l=0}^{2}a_{kl}\varphi_{kl}(t,\tau_y)\\ \sum_{k=0}^{m_z}\sum_{l=0}^{2}a_{kl}\varphi_{kl}(t,\tau_z)\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}\varphi(t,\tau_x)A\\ \varphi(t,\tau_y)A\\ \varphi(t,\tau_z)A\end{vmatrix}, \qquad (4)$$

где $A^T=|a_{00}a_{01}a_{02}...a_{k0}a_{k1}a_{k2}...a_{m0}a_{m1}a_{m2}|$;

a_{kl} – коэффициенты сглаживающего полинома;

l = 0, 1, 2;

m – степень сглаживающего полинома.

Следует обратить внимание на особенности описанных в (2) и (4) способов полиномиального представления стохастических траекторий:

- при любом способе вектор-функция *r(t)* нелинейно зависит от времени и линейно от коэффициентов сглаживающего полинома;
- в представлении (2) формирование $x(t, A_x)$, $y(t, A_y)$, $z(t, A_z)$ происходит с участием различных составляющих вектора A, объединенных соответственно в A_x, A_y, A_z;
- в представлении (4) каждая координатная составляющая $x(t, \tau_x, A)$, $y(t, \tau_y, A)$, $z(t, \tau_z, A)$ формируется с участием всех компонентов вектора *A*.

Стохастический характер траектории летательного аппарата (ЛА) вносит существенную особенность в решение задачи оптимальной оценки вектора *A* – коэффициентов сглаживающего полинома, которая состоит в том, что оптимальная оценка коэффициентов сглаживающего полинома должна быть увязана с определением их состава. Это приводит к необходимости получения статистически независимых оценок коэффициентов сглаживающего полинома. Ввиду того, что стохастический характер траекторий трудно совместим с их высокой априорной определенностью, прикладные методы обработки данных траекторных измерений целесообразно строить на основе статистических методов, не связанных с использованием априорной информации о распределении составляющих вектора *A* – коэффициентов сглаживающего полинома. В связи с тем, что векторы ξ-измерений и коэффициентов сглаживающего полинома являются многомерными случайными величинами, взаимное соответствие между ними определяется совместной плотностью вероятности.

Из-за нелинейной зависимости вектора измерений от вектора коэффициентов сглаживающего полинома, решение задачи по определению максимально правдоподобной оценки (МПО) вектора $\hat{A}$ целесообразно искать методом последовательных приближений. Для совместной реализации пространственной и временной избыточности данных измерений с целью определения статистической оценки (СО) вектора A – коэффициентов сглаживающего полинома и с учетом вышеизложенного, в работах [4, 5] получен универсальный итеративный алгоритм

$$\hat{A}_{v+1} = \hat{A}_v + \Delta\hat{A}_v = \hat{A}_v + (J_v^T \Lambda J_v)^{-1} J_v^T \Lambda \{\xi - \xi[r(t, A_v)]\}, \quad (5)$$

где J – Якобиева матрица частных производных от измеряемых по вычисляемым параметрам;

v – номер v-го приближения;

$J_v^T \Lambda J_v$ – основная матрица системы уравнений на v-ом шаге приближения;

Λ – весовая матрица ошибок измерений.

Из (5) следует, что СО достигается через ряд последовательных приближений, в которых основным моментом является решение линеаризованной системы уравнений с целью определения вектора поправки $\Delta\hat{A}_v$.

Указанный алгоритм инвариантен к закону распределения ошибок траекторных измерений, что очень важно для его практической реализации. К законам распределения ошибок измерений остаются чувствительными лишь свойства полученной с помощью этого алгоритма СО:

- при нормальном законе – это максимально правдоподобная оценка;
- при других законах – это минимально квадратическая оценка.

Перечень ссылок

1. Башков Е. А. Адаптивное нелинейное оптимальное сглаживание многопараметрических данных измерений / Е. А. Башков, В. В. Паслен // Университетские микроспутники – перспективы и реальность : междунар. науч.-практ. конф. / НЦАОМ им. А. М. Макарова. – Днепропетровск, 2006. – С. 67.

2. Мильштейн А. В. Метод нелинейного сглаживания в обработке данных траекторных измерений / А. В. Мильштейн, В. В. Паслен // Зб. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк : ДонІЗТ. – Випуск 28. – 2011. – С. 94–101.

3. Мильштейн А. В. Выбор структуры ортогональных базисных функций / А. В. Мильштейн, В. В. Паслен // Новітні технології в телекомунікаціях : V Міжнарод. наук.-техн. сімпозіум, 17–21 січня 2012 р. : зб. тез. – К., 2012. – С. 93–95.

4. Огоднийчук Н. Д. Исследования на ЭВМ свойств систем ЛНБФ и Λ-ОБФ как функции двух аргументов / Н. Д. Огоднийчук, В. В. Паслен, С. В. Велигдан // Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Вып. 3. – К. : КВВАИУ, 1989. – С. 90–93.

5. Огоднийчук Н. Д. Алгоритм совместной реализации пространственной и временной избыточности данных внешнетраекторных измерений / Н. Д. Огоднийчук, В. В. Паслен // Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Вып. 3. – К. : КВВАИУ, 1989. – С. 85–89.